

Обчислення кількості опадів на українських метеостанціях із урахуванням впливу вітру

Валерій Валерійович Осипов¹,

к. геогр. н., старший науковий співробітник відділу гідрохімії

¹Українського гідрометеорологічного інституту, пр. Науки, 37, м. Київ, 03028, Україна,

e-mail: valery_osipov@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-4853-8021>;

Андрій Сергійович Бончковський¹,

молодший науковий співробітник відділу гідрохімії,

e-mail: andriybonch19@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3275-6772>;

Андрій Васильович Орещенко¹,

к. геогр. н., старший науковий співробітник відділу прикладної метеорології та кліматології,

e-mail: logograd@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-8363-6885>;

Дмитро Олександрович Ошурок¹,

к. геогр. н., старший науковий співробітник відділу фізики атмосфери,

e-mail: oshurok.dm@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1192-3823>;

Наталія Миколаївна Осадча¹,

д. геогр. н., завідувачка відділу гідрохімії,

e-mail: nosad@uhmi.org.ua, <https://orcid.org/0000-0001-6215-3246>

Вимірювання опадів включають випадкові та систематичні похибки. Перші пов'язані з вимірювальною частиною приладу та мікрокліматичними умовами території, другі – з впливом вітру, випаровуванням та змочуванням стінок приймача. Вітрові вихори, що утворюються під час зіткнення вітрового потоку та верхньої частини приймача опадоміра, перешкоджають потраплянню опадів у приймач та найбільше зменшують справжню кількість опадів. В Україні така аеродинамічна похибка не обчислюється під час запису вимірювань, тому для проведення гідрологічних і кліматичних досліджень архівні дані мають пройти попереднє коригування. Метою роботи було приведення вимірної на метеостанціях України кількості опадів до реальних величин. Розглянуто чотири методи врахування аеродинамічної похибки опадоміра Третьякова з вітровим захистом: Голубева, Янга, Брязгіна та Норвезького метеорологічного інституту. Опрацьовано дані строкових спостережень за опадами на метеостанціях України за період 1976–2019 рр. Програма метеорологічних спостережень містить всю необхідну інформацію для виконання розрахунків: швидкість та напрямок вітру, температуру повітря, атмосферний тиск та парціальний тиск водяної пари, тривалість низової та загальної заметілі. Швидкість вітру приведено до висоти приймача опадоміра (2 м) з урахуванням закритості та оточення метеомайданчика. Встановлено, що за різними методами коригування недооблік середньорічної кількості опадів коливається у межах 5–10%, із них для снігу – 18–27%, для дощу – 3–7%. За коригованими значеннями оновлено мапу річної суми опадів на території України за період 1990–2019 рр. Для подальшого використання у гідрологічних і кліматичних дослідженнях результати спостережень за опадами мають бути кориговані з врахуванням аеродинамічної похибки.

Ключові слова: аеродинамічна похибка, недооблік опадів, швидкість вітру, атмосферні опади, опадомір Третьякова, мапа атмосферних опадів

Як цитувати: Осипов В. В. Обчислення кількості опадів на українських метеостанціях із врахуванням впливу вітру / В. В. Осипов, А. С. Бончковський, А. В. Орещенко, Д. О. Ошурок, Н. М. Осадча // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2021. – Вип. 55. – С. 204–215. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-55-15>

In cites: Osypov V. V., Bonchkovskiy A. S., Oreshchenko A. V., Oshurok D. O., Osadcha N. M. (2021). Quantifying wind-induced undercatch in the precipitation measurements at Ukrainian weather stations. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (55), 204–215. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-55-15> [in Ukrainian]

Постановка проблеми. Гідрологічні розрахунки для окремих басейнів чи територіальних адміністративних одиниць виявляють високу чутливість до точності вимірювань опадів. Це пов'язано з тим, що гідрологічний режим річок є відображенням кліматичних особливостей території, а основними компонентами водного балансу є опади та випаровування.

У сучасний період наукові та прикладні завдання у галузі кліматології та водних ресурсів вирішуються здебільшого за допомогою моделювання. Вирішальне значення для ефективної

роботи моделей мають вхідні дані щодо опадів, їхня повнота, періодичність і точність вимірювання.

На мережі метеостанцій України для строкового визначення кількості опадів використовують опадомір Третьякова (опадомір О-1), який був впроваджений у 50-тих роках минулого сторіччя, і до цього часу залишається основним засобом фіксації опадів. У центрі опадоміра розташований приймальний стакан, оточений планками у вигляді трапеції для вітрового захисту (рис. 1А). Однак, досвід показав, що вони повні-

стю не запобігають утворенню вітрових вихорів, які перешкоджають потраплянню опадів у середину приймального стакану. В Україні така аеродинамічна поправка не обчислювалась, вочевидь,

через складність процедури [1, 2], тому для проведення гідрологічних і кліматичних досліджень архівні дані мають пройти попереднє коригування.

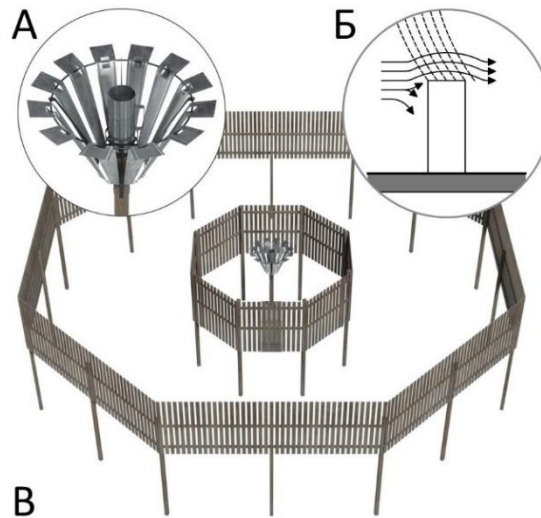


Рис. 1. А – Опадомір Третьякова з вітровим захистом (Опадомір О-1). Б – Викривлення вітрового поля над приймачем опадоміра Третьякова (адаптовано з [3]). В – Еталонна система з подвійним парканом, розроблена [4] і прийнята Всесвітньою Метеорологічною Організацією (ВМО).

Fig. 1. А – Tretyakov wind-shielded precipitation gauge, В – wind-induced turbulence over Tretyakov precipitation gauge (adopted from [3]). С – Double-Fence International Reference developed [4] and accepted by World Meteorological Organization (WMO)

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Не дивлячись на простоту конструкції опадоміра, результати вимірювань кількості опадів містять випадкову та систематичні похибки. Випадкова похибка пов'язана з вимірювальною частиною приладу та мікрокліматичними особливостями території. Дослідженнями, виконаними у 1970-х роках [5], встановлено, що значення цієї похибки як для строкових, так і середніх місячних значень не перевищує 10%.

Систематичні похибки під час вимірювання опадів, як правило, зменшують їхню фактичну кількість. Впливовість цих похибок зростає в такому порядку: випаровування, змочування стінок приймача, аеродинамічна похибка [6]. Методика визначення перших двох похибок добре відпрацьована, пройшла практичне випробування й не містить складнощів. Поправка на змочування та випаровування введена в Настанову з проведення спостережень у 1966 р. і враховується до цього часу. Для коригування отриманих раніше даних для кожної метеостанції був визначений коефіцієнт перерахунку (К3), опублікований у [7].

Найбільші труднощі спричиняє аеродинамічна похибка, що зумовлена викривленням вітрового поля над приймачем опадоміра. Це заважає потраплянню як твердих, так і рідких опадів у колектор, і призводить до заниження їхньої фактичної кількості [3, 8] (рис. 1Б). Експерименти

показали, що така похибка для опадоміра Третьякова з вітровим захистом може досягати 14% для дощу та 40% для снігу [9].

Найкращим способом нівелювання впливу аеродинамічних чинників ($K = 1$) є використання опадоміра, який з усіх боків затулений кущами на рівні отвору приймача [9]. Однак, застосування такого укриття можливе не в усіх кліматичних умовах, тому у якості еталона прийнято опадомір Третьякова, огорожений навкруги подвійним парканом (рис. 1В). Але такий захист важко організувати та утримувати на кожному метеомайданчику, тому на регулярній мережі спостережень він не використовується.

Вказана проблема стимулювала розроблення методів приведення вимірної кількості опадів до дійсних величин. Дослідження Головної Геофізичної Обсерваторії ім. Воєйкова (ГГО) та Державного гідрологічного інституту (ДГІ), виконані у 70–80 рр. ХХ ст., дали змогу встановити поправочні коефіцієнти для середніх річних і місячних значень опадів. Перші алгоритми коригування були розроблені на підставі емпіричних досліджень за допомогою порівняння кількості опадів, виміряних опадоміром Третьякова, із показниками іншого приладу, вітрова похибка якого прямує до нуля [10, 11]. Методика, розроблена В.С. Голубевим, у 1998 р. дістала схвалення ВМО [9]. На початку 2000 р. низкою авторів була запропонована покращена модель, що врахову-

вала «хибні» опади під час загальної та низової заметілі [10, 12, 13].

Для розрахунку місячних водних балансів річкових басейнів був рекомендований метод ДГІ [14].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Розроблені алгоритми коригування строкових або добових сум опадів наразі не використовуються як безпосередньо на метеостанціях, так і під час архівування накопиченої інформації.

Отже, метою нашої роботи було приведення вимірної на метеостанціях України кількості опадів до реальних величин, а саме з урахуванням впливу вітру. Головними завданнями були оцінювання наявних методів розрахунку аеродинамічної поправки та створення електронного архіву відкоригованих значень опадів для метеостанцій України на основі строкових спостережень.

У роботі з використанням чотирьох методик розраховано аеродинамічну похибку для всіх метеостанцій України, які діяли в період 1976–2019 рр. Отримані результати порівняли з експериментальними даними ВМО, на основі чого обрано оптимальні моделі для подальшого використання в умовах України. За коригованими значеннями побудовано мапу річної кількості опадів на території України.

Викладення основного матеріалу дослідження. У роботі використано строкові дані регулярних метеорологічних спостережень мережі станцій Гідрометслужби України (нині управ-

ління з гідрометеорології ДСНС України) за період 1976–2019 рр. Загалом оброблено дані з 207 метеостанцій. Для побудови мапи аеродинамічної похибки та мапи річної кількості опадів використано 187 метеостанцій, для яких період спостережень складав щонайменше 20 років.

Розрахунок аеродинамічної похибки

Реальна кількість опадів розраховується за формулою [1]:

$$P = K \cdot (P'' + \Delta P - P''_{f1} - P''_{f2}), \quad (1)$$

де K – коефіцієнт, що враховує втрати через деформацію вітрового поля над приймальним отвором опадоміра, P'' – вимірювання за опадомірним стаканом, ΔP – поправка на змочування та випаровування, P''_{f1} і P''_{f2} – поправки, що враховують кількість «хибних» опадів, що зумовлені замітанням снігу під час загальної та низової заметілі, відповідно.

Поправка на змочування у випадку наявності слідів рідких або змішаних опадів становить 0,1 мм, в інших випадках – 0,2 мм. Коли кількість твердих опадів перевищує 0,1 мм, ця поправка приймається рівною 0,1 мм [2]. Поправка на випаровування, як правило, складає менше 1%, тому нею можна знехтувати [15]. Кількість «хибних» опадів за швидкості вітру менше 4,2 м/с приймається рівною 0 [12].

Для опадоміра Третьякова розроблено декілька методик визначення коефіцієнту K (табл. 1). Визначальним чинником, передусім, є швидкість вітру на висоті приймача опадоміра, але також впливає форма крапель або сніжинок, яка визна-

Таблиця 1

Методології розрахунку аеродинамічної поправки для опадоміра Третьякова з вітровим захистом

Автор методології	Змінні	Застосування
Голубев [1, 9, 12]	Швидкість вітру ^a , температура повітря, атмосферний тиск на станції, парціальний тиск водяної пари. Для врахування хибних опадів: тривалість загальної та низової заметілі, довжина розгону заметілі ^b	строкові дані, швидкість вітру під час твердих опадів < 10 м/с
Норвезький метеорологічний інститут (НМІ) [16]	Швидкість вітру, температура повітря, інтенсивність дощу ^c	строкові дані, швидкість вітру під час твердих опадів < 7 м/с
Янг [17]	Швидкість вітру, максимальна та середня температура повітря	середньодобові дані, швидкість вітру під час твердих опадів < 8 м/с
Брязгін [18]	Швидкість вітру, температура повітря, відсутність або наявність заметілі протягом місяця	коригування місячних значень

^a Швидкість вітру на висоті установки опадоміру (для українських станцій дорівнює 2 м).

^b Довжина розгону заметілі визначається приблизно за описом оточення метеомайданчика [19].

^c За браком даних розраховується за методологією [1].

чається температурою і вологістю повітря та атмосферним тиском [9].

Швидкість вітру (U_h) на висоті приймача опадоміра (h) перераховується за формулою [1]:

$$U_h = U_H m_A \ln((h - h_s)/z_0) / \ln((H - h_s)/z_0), \quad (2)$$

де U_H – швидкість вітру на висоті вимірювача швидкості вітру на метеомайданчику, м/с; m_A – коефіцієнт, що характеризує викривлення логарифмічного профілю вітру під впливом перешкод навколо опадоміра; H – висота розташування вітровимірювального приладу, м; h_s – висота снігового покриву в пункті спостережень, м; z_0 – параметр шорсткості підстильної поверхні навколо опадоміра ($z_0 = 0,01$ м – суцільний сніговий покрив, $z_0 = 0,03$ м – трав'яний покрив або сніговий покрив менше половини).

Коефіцієнт m_A розраховується за формулою:

$$m_A = 1 - 0,024\alpha_A, \quad (3)$$

де α_A – вертикальний кут закритості горизонту в напрямку вітру в місці установки опадоміра; кут ϵ в довіднику [19].

За швидкості вітру понад 10 м/с через значну похибку перерахунку виміряне значення можна не враховувати, а умовно приймати кількість опадів як добуток багаторічної місячної інтенсивності опадів на тривалість хуртовини [1].

Побудова мапи атмосферних опадів

За коригованими значеннями опадів побудовано мапу річної кількості опадів на території

України за період 1990–2019 рр. Вибір періоду обумовлено тим, що 1989 рік визначено як початок глобального потепління в межах України [20].

За допомогою геоінформаційної системи QGIS створено тематичний шар ізогіст із пошаровим зафарбуванням, який накладено на векторну картографічну основу, оцифровану в редакторі InkScape. Крім введення поправок для метеостанцій за методикою Голубева, для гірських країн Карпат і Криму введено поправки за висотою рельєфу. Для помірного поясу кількість опадів зростає зі збільшенням висоти, що зумовлено вертикальним градієнтом температури, бар'єрним і депресивним ефектами [21]. Більш детально вплив макрорельєфу на кількість опадів викладено в дослідженні [22], згідно з яким найважливішими чинниками є експозиція схилу, висота місцевості і вертикальне розчленування рельєфу. Усі ці результати, а також методика статті [23] були використані для виконання інтерполяції кількості опадів методом регресійного крігінгу. Форму ізогіст було згладжено, а їхнє укладання виконано у межах допустимої графічної точності (0,3 мм) для покращення читаності мапи. Ізогії на мапі проведені через 50 мм, 100 мм і 200 мм, починаючи з сум опадів 400, 700 і 1000 мм відповідно. Обрані інтервали дають змогу порівнювати її із мапою “Атмосферні опади. Рік” Національного Атласу України [24].

Кількісне оцінювання аеродинамічної похибки. У таблиці 2 представлено результати розра-

Таблиця 2

Розрахована частка опадів (%), яку вловлює опадомір Третякова з вітровим захистом				
Середньорічна швидкість вітру на метеостанції, м/с (кількість метеостанцій)	Метод корекції опадів			
	Голубев	Брязгін	НМІ	Янг
0 – 4 (187)	95.0%	90.5%	91.8%	91.0%
0 – 1 (26)	98.7%	96.1%	97.8%	95.5%
1 – 2 (109)	95.7%	91.2%	92.9%	91.8%
2 – 3 (43)	92.4%	87.1%	87.7%	88.0%
3 – 4 (9)	88.8%	83.3%	83.1%	83.8%
Сніг^a				
0 – 4 (187)	82.3%	72.6%	73.8%	79.0%
0 – 1 (26)	94.1%	84.8%	90.3%	92.6%
1 – 2 (109)	84.0%	73.9%	76.2%	82.1%
2 – 3 (43)	75.0%	66.1%	64.6%	70.2%
3 – 4 (9)	70.3%	62.1%	58.4%	60.3%
Дош^b				
0 – 4 (187)	97.4%	94.3%	95.6%	93.3%
0 – 1 (26)	99.5%	98.2%	99.1%	96.0%
1 – 2 (109)	98.0%	95.1%	96.5%	93.7%
2 – 3 (43)	95.6%	91.4%	92.7%	91.4%
3 – 4 (9)	92.3%	87.9%	89.0%	89.0%

^a Під снігом умовно вважаються опади за температури $< 0^\circ\text{C}$

^b Під дощем умовно вважаються опади за температури $> 0^\circ\text{C}$

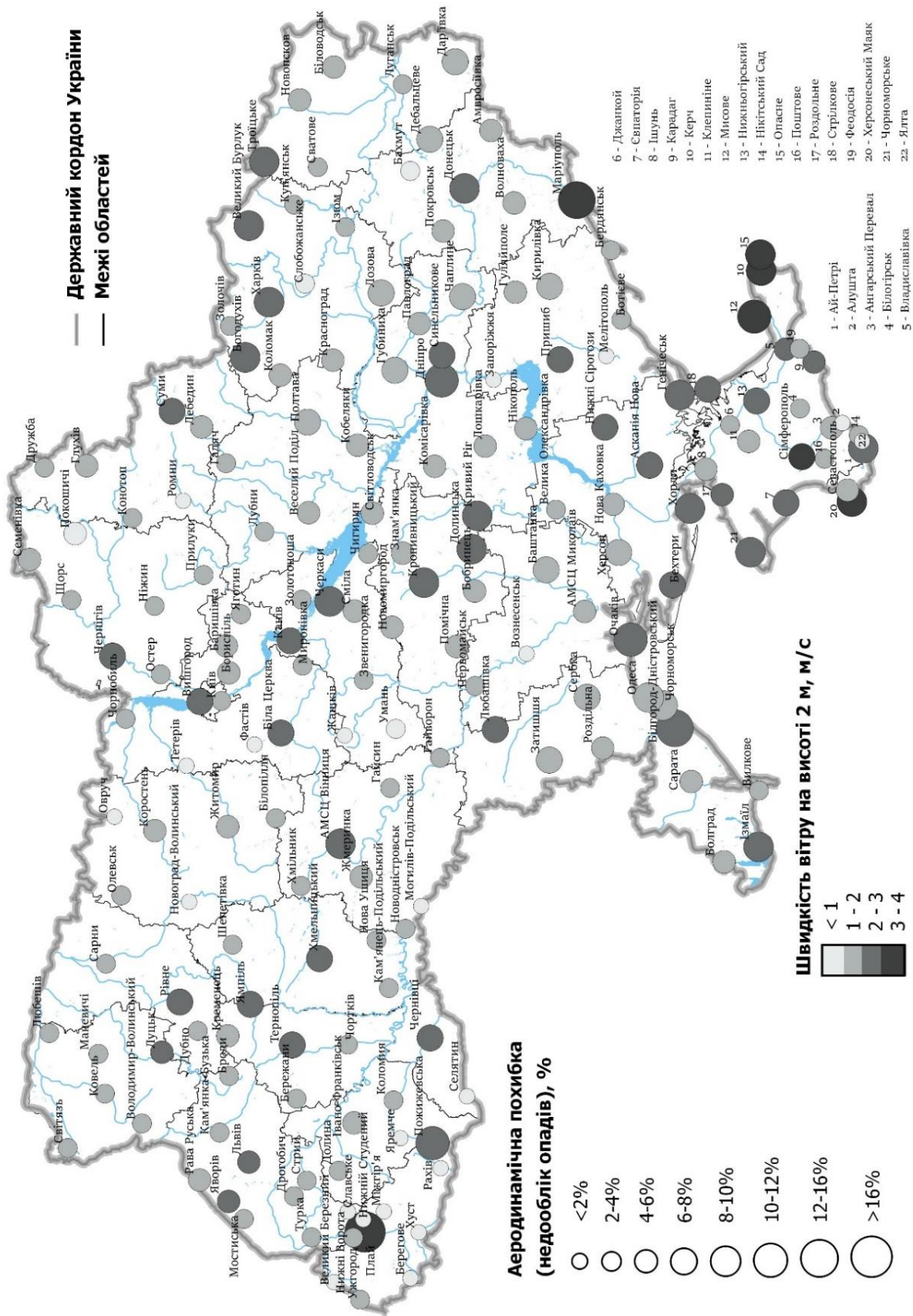


Рис. 2. Середньорічна аеродинамічна похибка (недооблік опадів) вимірювань опадів на метеостанціях України, 1976–2019 pp.
 Fig. 2. Mean annual aerodynamic error (wind-induced undercatch) of precipitation measurements at the Ukrainian meteorological stations, 1976–2019

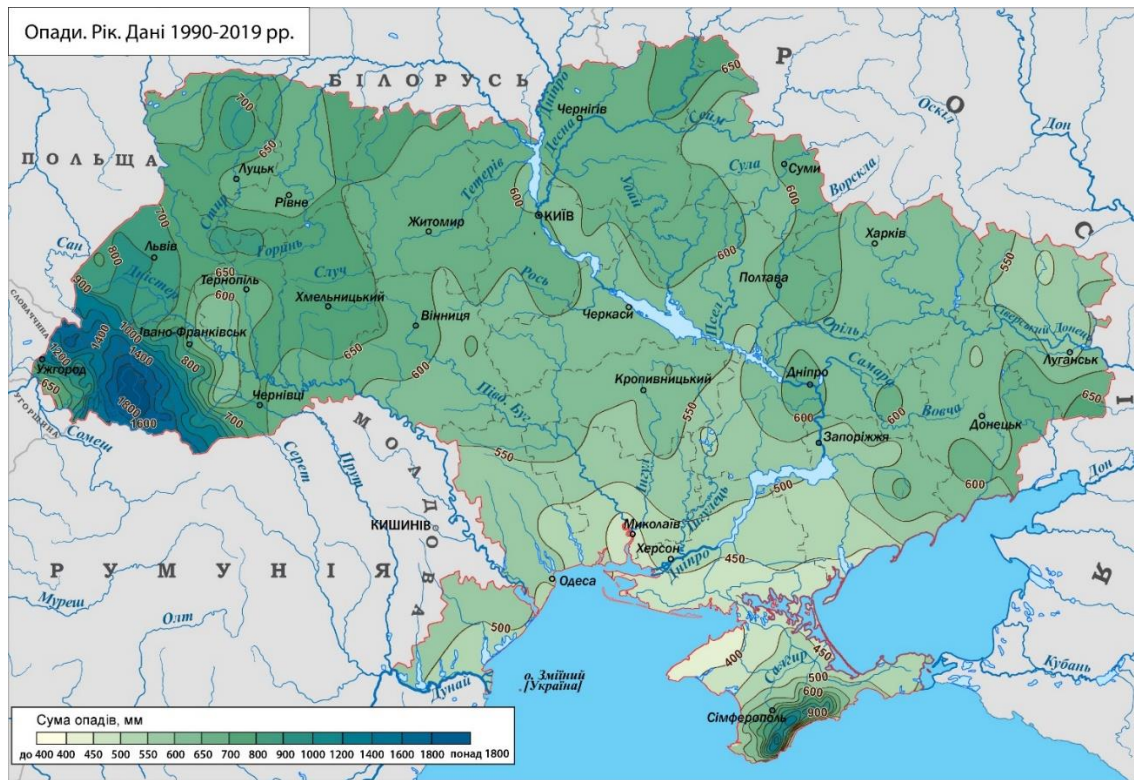


Рис. 3. Річна кількість опадів (мм) із врахуванням аеродинамічної поправки за методологією Голубєва, 1990–2019 рр.

Fig. 3. Annual total precipitation (mm) with correction on wind-induced undercatch according to Golubev methodology, 1990–2019

хунків частки вимірюваної кількості опадів проти їхньої дійсної величини за період 1976–2019 рр. Значення згруповано залежно від середньорічної швидкості вітру на метеостанції. Як видно, середньорічна кількість опадів, не врахованих опадоміром Третьякова через вплив вітру, складає від 5% до 9,5% залежно від обраного методу коригування. Найбільша похибка спостерігається під час вимірювань твердих опадів – від 17,7% до 27,4%.

Просторовий розподіл аеродинамічної похибки за методикою Голубєва показано на рисунку 2. Встановлено, що втрати опадів збільшуються зі зростанням середньорічної швидкості вітру на метеостанції (коефіцієнт кореляції $r = 0,89$). По-друге, втрати вищі на тих метеостанціях, де відзначається більша частка твердих опадів упродовж року ($r = 0,42$).

Середня швидкість вітру для метеостанцій України на висоті приймача опадоміра (2 м) складає 1,67 м/с за варіабельності 0,5–3,91 м/с. Здебільшого суміжні станції мають помітно різну швидкість вітру, що обумовлено різною закритістю горизонту навколо метеомайданчика. Особливо це помітно в гірських районах, де також додається вплив висоти місцевості.

Карта атмосферних опадів. Опади на території України зменшуються в напрямку з півночі

та північного заходу на південь і південний схід, що обумовлено загальним впливом атмосферної циркуляції [15] (рис. 3). Найбільша кількість опадів випадає в гірській місцевості. Тут через складний рельєф та низьку щільність метеостанцій наведені значення кількості опадів мають найбільшу похибку.

У порівнянні з попередніми мапами опадів, опублікованими в Національному атласі України [24] та монографії «Клімат України» [25], річна кількість опадів зросла на 25–50 мм для рівнинної частини та до 300 мм у гірській місцевості. Здебільшого це зумовлено тим, що в попередній час поправку на вплив вітру для побудови карт не вносили [7, 26].

Обговорення результатів. Отримані результати показали, що через вплив вітру інструментальні спостереження на метеостанціях України занижують реальну річну кількість опадів у середньому на 5–10% залежно від методики розрахунку. Частка вловлених опадів на метеостанціях, захищених різними перешкодами та з меншою часткою твердих опадів, становить 96–99,8% за методикою Голубєва та 92–97% за методологією Янга. На відкритих метеопостах на високогір'ї або біля берегової лінії вона не перевищує 91% (89% за методикою Янга).

Як правило, аеродинамічна похибка є найбі-

льшою систематичною похибкою, порівнюючи із втратами на змочування та випаровування.

Загалом отримані результати співставні з дослідженнями ВМО, присвяченими порівнянню даних опадоміра Третьякова з результатами, отриманими еталонною системою з подвійним

парканом [9]. Ці дослідження ВМО показали, що частка вловлених опадів складає 59–92% для снігу та 81–95% для дощу (табл. 3). Водночас станції Бісмарк та Реджайна, де зафіксовано лише 3–5 випадків дощу, не розглядалися.

Варіабельність результатів вловлених опадів

Таблиця 3

Порівняння даних опадоміра Третьякова з вітровим захистом з еталонною системою з подвійним парканом (DFIR) на 11-ти метеостанціях ВМО

Станція	Сніг				Дощ			
	кількість подій, дні	U_h , м/с	DFIR, мм	вловлені опади, %	кількість подій, дні	U_h , м/с	DFIR, мм	вловлені опади, %
Валдай	304	4,1	1181,7	63,1	230	3,8	1259,2	91,4
Рейнольдс	50	2,5	105,6	84,4	40	2,7	206,4	92
Денвілл	157	1,5	1036,2	91,6	30	1	446,3	94,3
Йокіойнен	334	2,6	740,9	67,2	567	2,5	1694,4	86,6
Гарцгероде	42	3	112,7	72,2	172	4,2	475,3	81,3
Бісмарк	32	3,3	94,6	65,4	3	3,3	9,3	71,6
Хосені	94	1,1	194	85,8	34	1,2	85	90,6
Парг	65	1	486,9	91	141	1,6	1573,8	88,2
Трент У	76	2	262	81,1	80	1,9	581,9	95
Реджайна	117	3,5	199,1	59,4	5	3,9	5,1	97,4
Кортрайт	107	2,5	274,7	83,1	64	2,3	342,6	90

U_h – швидкість вітру на висоті опадоміра

зумовлена як різною швидкістю вітру на станціях, так і різною кількістю опадів за добу – відсоток втрат вище для менших значень. Відтак, на станції Валдай, де середня кількість дощу становить 5,5 мм (1259,2/230) за добу, втрати на 10% менші, ніж на станції Гарцгероде, де середня кількість – 2,8 мм (475,3/172).

Експерименти також засвідчують, що строкові дані вимірювань опадів мають значне розсіювання. Випадкові похибки на станції Валдай у середньому становили 0,5–1 мм для різної форми опадів [9]. А різниця у вимірах двох розташованих на одному метеомайданчику приладів може досягати 11% для снігу (22% для заметілі), 7% для змішаних опадів та 3% для дощу [27].

Методи коригування опадів побудовано на основі різних експериментальних даних. Голубєв використав спостереження на станції Валдай [9]. Це пояснює близькі значення частки вловлених опадів до розрахункових значень на українських метеостанціях із середньою швидкістю вітру 3–4 м/с. Методологія Норвезького метеорологічного інституту спирається на дані зі станції Йокіойнен [16]. Янг побудував рівняння регресії на даних усіх 11-ти станцій ВМО [17]. У порівнянні з Валдаєм, на інших станціях зафіксовано більш суттєві втрати дощу, що пояснює різницю розрахункових значень для дощу за методами Голубєва та Янга для метеостанцій України.

Проблема методик коригування опадів полягає в тому, що рівняння розробляються на базі

найчастіших подій – це опади за швидкості вітру 0–4 м/с. У зв'язку з цим методики НМІ, Брязгіна та Янга, ймовірно, переоцінюють недооблік снігу за швидкості вітру понад 4–6 м/с. Методика Голубєва, вдосконалена у 2000 р., дає змогу враховувати «хибні» тверді опади під час вітру понад 4,2 м/с [12]. Це пояснює той факт, що похибка, розрахована за моделлю Голубєва, найменша і, порівнюючи з експериментальними даними, виглядає більш прийнятною для твердих опадів.

Можливість застосування моделей коригування кількості опадів залежить від наявних спостережень, які характеризують швидкість вітру та форму опадів. Оскільки на українських метеостанціях швидкість вітру вимірюється здебільшого на висоті 10–12 м, то необхідно знати напрямок вітру та закритість горизонту навколо опадоміра, щоби привести швидкість до висоти 2 м. Для визначення форми опадів (рідкі, змішані, тверді) у рівняннях використовується температура, але в методології Голубєва, окрім цього, вводяться показники атмосферного тиску та парціального тиску водяної пари як непрямих характеристик розміру крапель або сніжинок. Для розрахунку «хибних» опадів (тільки методика Голубєва) необхідно знати тривалість заметілі та довжину її розгону, що є характеристикою оточення метеомайданчика.

Стандартна програма строкових спостережень містить повний комплекс метеорологічних параметрів, необхідних для розрахунку коригую-

чих коефіцієнтів – швидкість та напрямок вітру, температура повітря, атмосферний тиск та парціальний тиск водяної пари, тривалість низової та загальної заметілі. Проте зведена форма представлення добових даних не приймає до уваги напрямку вітру.

Також є прогалини в описі оточення метеомайданчиків [19]. По-перше, закритість горизонту за останні 50 років вимірювалася на українських метеостанціях тільки 2 рази: здебільшого за періоди 1970–1985 та 2004–2005 рр. По-друге, важко визначити довжину розгону заметілі з наявного словесного опису оточення метеомайданчика без карти-схеми з відстанями до перешкод у всіх напрямках.

Недооблік опадів призводить до помилок у гідрологічних та кліматологічних розрахунках [28]. Наприклад, заниження реального випаровування та/або водного стоку, виявлення «хибних» трендів зменшення швидкості вітру та кількості опадів через зміну закритості станції. Окрім цього, похибка міститься і в глобальних мережах опадів, які побудовані за допомогою інтерполяції архівних даних [29].

Детальні рекомендації щодо проведення інструментальних спостережень наведено в рекомендаціях ВМО [30, 31]. Згідно з ними у пунктах вимірювання опадів мають, щонайменше, проводитися дослідження швидкості та напрямку вітру, температури, а також має бути побудований графік закритості горизонту й карта-схема перешкод відносно опадоміра. В архівах мають зберігатися як кориговані, так і некориговані значення, оскільки методи корекції можуть бути вдосконалені в майбутньому.

Висновки. Деформація вітрового потоку над отвором опадоміра занижує реальну кількість середньорічних опадів (аеродинамічна похибка) на 5–10% залежно від методу розрахунку похибки. На захищених від вітру метеомайданчиках таке заниження становить у середньому 2–6%, а на відкритих ділянках у високогір'ї або біля берегової лінії є найбільшим і досягає 19–26%. Тверді опади більш чутливі до впливу вітру – втрати снігу становлять у середньому 18–27%, тоді як дощу – 3–7%.

Відповідно до сучасних настанов метеорологічних спостережень аеродинамічна поправка не застосовується ні для поточних, ні для архівних даних кількості опадів. У зв'язку з цим для подальшого використання у гідрологічних та кліматологічних дослідженнях значення вимірних опадів мають бути належним чином відкориговані. Строкові спостереження мають всю необхідну інформацію для розрахунку аеродинамічної поправки, водночас, опис оточення та закритості метеомайданчика рекомендовано оновлювати частіше.

За нашим оцінюванням, методики Голубєва та Янга для коригування кількості опадів надають найбільш точну інформацію для території України. На станціях, де часто спостерігаються заметілі, з метою врахування кількості «хибних» опадів рекомендовано надавати перевагу методології Голубєва.

Створено електронний архів строкових та щоденних сум коригованих значень опадів за методологією Голубєва та Янга для 207 метеостанцій України за період 1976–2019 рр.

Список використаної літератури

1. Богданова Э. Г. Новая модель корректировки измеренных осадков и её применение в полярных районах России / Э. Г. Богданова, В. С. Голубев, Б. М. Ильин, И. В. Драгомилова // *Метеорология и гидрология*. – 2002. – Вып. 10. – С. 68–94.
2. Державна гідрометеорологічна служба. Настанова гідрометеорологічним станціям і постам. Випуск 3. Частина 1. Метеорологічні спостереження на станціях / Державна гідрометеорологічна служба. – Україна: 2011. – 280 с.
3. Sevruk V. The effect of dimensions and shape of precipitation gauges on the wind-induced error / V. Sevruk, V. Nespor // *Global Precipitations and Climate Change*. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1994. – P. 231–246. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-79268-7_14
4. Голубев В. С. Исследование влияния двойных заборных защит на показания осадкомера Третьякова / В. С. Голубев // *Труды ГГИ*. – 1979. – Вып. 258. – С. 91–101.
5. Алексеев Г. А. Методы оценки случайных погрешностей гидрометеорологической информации / Г. А. Алексеев. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1975. – 96 с.
6. Всемирная Метеорологическая Организация. Руководство по гидрологической практике. Том 1. Гидрология: от измерений до гидрологической информации / Всемирная Метеорологическая Организация. – 2008. – 314 с.
7. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1–6. Выпуск 10. Украинская ССР. Книга 1 / Ред. Н. С. Смирнова. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1990. – 605 с.
8. Baghapour B. Numerical simulation of wind-induced turbulence over precipitation gauges / B. Baghapour, C. Wei, P. E. Sullivan // *Atmospheric Research*. – 2017. – Vol. 189. – P. 82–98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.01.016>
9. Goodison B. E. WMO solid precipitation measurement intercomparison: Final report / B. E. Goodison, P. Y. T. Louie, D. Yang. – 1998. – 212 p.

10. Богданова Э. Г. Учет ветровой погрешности измерения осадков при вычислении их средних многолетних значений (норм) / Э. Г. Богданова // Труды ГГО. – 1968. – Вып. 215. – С. 45–56.
11. Голубев В. С. Методика корректировки срочных и месячных величин атмосферных осадков и результаты ее проверки / В. С. Голубев // Труды ГГИ. – 1973. – Вып. 207. – С. 11–27.
12. Коновалов Д. А. Полная модель корректировки осадкомерных данных; методика и алгоритм оценки систематических составляющих / Д. А. Коновалов, В. С. Голубев, Э. Г. Богданова, Б. М. Ильин // Papers presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2000). WMO/TD- No. 1028; IOM Report- No. 74. – 2000. – С. 136–139.
13. Богданова Э. Г. Опыт применения усовершенствованной методики корректировки суточных сумм осадков в различных климатических условиях / Э. Г. Богданова, Б. М. Ильин, И. В. Драгомиллова // Труды ГГО. – 2003. – Вып. 551. – С. 23–50.
14. Государственный гидрологический институт. Руководство воднобалансовым станциям / Государственный гидрологический институт. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1973. – 306 с.
15. Sevruk V. International comparison of national precipitation gauges with a reference pit gauge (WMO/TD-|No. 38) / V. Sevruk, W. R. Hamon. – Geneva: 1984. – 139 p.
16. Forland E. J. Manual for operational correction of Nordic precipitation data (Report No. 24/96) / E. J. Forland, P. Allerup, B. Dahlstrom[et al.]. – Oslo : 1996. – 66 p.
17. Yang D. Accuracy of Tretyakov precipitation gauge: Result of WMO intercomparison / D. Yang, B. E. Goodison, J. R. Metcalfe[et al.] // Hydrological Processes. – 1995. – Vol. 9, No. 8. – P. 877–895. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.3360090805>
18. Aleksandrov Y. I. Seasonal, interannual and long-term variability of precipitation and snow depth in the region of the Barents and Kara seas / Y. I. Aleksandrov, N. N. Bryazgin, E. J. Førland[et al.] // Polar Research. – 2005. – Vol. 24, No. 1–2. – P. 69–85. DOI: <https://doi.org/10.3402/polar.v24i1.6254>
19. Косовець О. Історія та фізико-географічний опис метеорологічних станцій України (кліматологічний довідник) / О. Косовець, Н. Шевень. – Київ: 2011. – 462 с.
20. Гребінь В. В. Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз) / В. В. Гребінь. – Київ: Ніка-центр, 2010. – 316 с.
21. Оленев А. М. Воздействие макрорельефа на климат и ландшафтные комплексы / А. М. Оленев. – Свердловск: 1987. – 86 с.
22. Мкртчян О. Інтерполяція даних метеоспостережень кількостей опадів та інших кліматичних змінних методом регресійного крігінгу / О. Мкртчян, П. Шубер // Вісник Львівського університету. Серія Географія. – 2013. – Вип. 42. – С. 258–264.
23. Мкртчян О. Методика геопросторового моделювання та картування кліматичних характеристик за даними спостережень / О. Мкртчян, П. Шубер // Вісник Львівського університету. Серія Географія. – 2011. – Вип. 39. – С. 245–253.
24. Барабаш М. Б. Атмосферні опади. Рік. / М. Б. Барабаш, О. Є. Пахалюк, О. Г. Татарчук // Національний атлас України. – Київ: 2007. – С. 435.
25. Клімат України / Ред. В. М. Ліпінський, В. А. Дячук, В. М. Бабіченко. – Київ: Вид-во Раєвського, 2003. – 343 с.
26. Барабаш М. Б. Дослідження змін та коливань опадів на рубежі XX і XXI ст. в умовах потепління глобального клімату / М. Б. Барабаш, Т. В. Корж, О. Г. Татарчук // Наук. праці УкрНДГМІ. – 2004. – Вип. 253. – С. 92–102.
27. Yang D. Comparison of winter precipitation measurements by six Tretyakov gauges at the Valdai experimental site / D. Yang, A. Simonenko // Atmosphere-Ocean. – 2014. – Vol. 52, No. 1. – P. 39–53. DOI: <https://doi.org/10.1080/07055900.2013.865156>
28. Karl T. R. Detecting climate variations and change: New challenges for observing and data management systems / T. R. Karl, R. G. Quayle, P. Y. Groisman // Journal of Climate. – 1993. – Vol. 6, No. 8. – P. 1481–1494. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<1481:DCVACN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<1481:DCVACN>2.0.CO;2)
29. Legates D. R. Global and terrestrial precipitation: A comparative assessment of existing climatologies / D. R. Legates // International Journal of Climatology. – 1995. – Vol. 15, No. 3. – P. 237–258. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.3370150302>
30. Всемирная Метеорологическая Организация. Руководство по приборам и методам наблюдений / Всемирная Метеорологическая Организация. – 2018. – 1385 p.
31. World Meteorological Organization. WMO solid precipitation intercomparison experiment (SPICE). Instruments and observing methods. Report No. 131 / World Meteorological Organization. – 2018. – 1445 p. – Режим доступу: https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=20742#.X5IglIgzZhE

Внесок авторів: Осипов В.В. – концептуалізація, підготовка вхідних даних, методологія, розрахунки, написання тексту; Бончковський А.С. – підготовка вхідних даних, розрахунки; Орещенко А.В. – методологія, побудова мапи опадів, написання тексту; Ошурок Д.О. – підготовка вхідних даних, написання тексту; Осадча Н.М. – написання тексту

Расчет количества осадков на украинских метеостанциях с учетом влияния ветра

Валерий Валерьевич Осипов¹,

к. геогр. н., старший научный сотрудник отдела гидрохимии

¹Украинского гидрометеорологического института, пр. Науки, 37, г. Киев, 03028, Украина;

Андрей Сергеевич Бончковский¹,

младший научный сотрудник отдела гидрохимии;

Андрей Васильевич Орещенко¹,

к. геогр. н., старший научный сотрудник отдела прикладной метеорологии и климатологии;

Дмитрий Александрович Ошурок¹,

к. геогр. н., старший научный сотрудник отдела физики атмосферы;

Наталья Николаевна Осадча¹,

д. геогр. н., заведующая отделом гидрохимии

Измерения осадков включают случайные и систематические погрешности. Первые связаны с измерительной частью прибора и микроклиматическими условиями территории, вторые – с воздействием ветра, испарением и смачиванием стенок приёмника. Ветровые вихри, образующиеся при обтекании ветрового потока верхней части приемника осадкомера, препятствуют попаданию осадков в приемник и преуменьшают действительное количество осадков. В Украине такая аэродинамическая погрешность не вычисляется во время записи измерений, поэтому для проведения гидрологических и климатических исследований архивные данные должны пройти предварительную корректировку. Целью работы было приведение измеренного на метеостанциях Украины количества осадков к реальным величинам. Рассмотрены четыре метода учета аэродинамической погрешности осадкомера Третьякова с ветровой защитой: Голубева, Янга, Брызгина и Норвежского метеорологического института. Обработано данные срочных наблюдений за осадками на метеостанциях Украины за период 1976–2019 гг. Программа метеорологических наблюдений содержит всю необходимую информацию для выполнения расчетов: скорость и направление ветра, температуру воздуха, атмосферное давление и парциальное давление водяного пара, продолжительность низкой и общей метели. Скорость ветра приведено к высоте приёмника осадкомера (2 м) с учётом закрытости и окружения метеоплощадки. Установлено, что по разным методам оценки недоучет среднегодового количества осадков колеблется в пределах 5–10%, из них для снега – 18–27%, для дождя – 3–7%. По скорректированным значениям обновлено карту годовой суммы осадков на территории Украины за период 1990–2019 гг. Для дальнейшего использования в гидрологических и климатических исследованиях результаты наблюдений за осадками должны быть скорректированы с учётом аэродинамической погрешности.

Ключевые слова: аэродинамическая погрешность, недоучет осадков, скорость ветра, атмосферные осадки, осадкомер Третьякова, карта атмосферных осадков.

Quantifying wind-induced undercatch in the precipitation measurements at Ukrainian weather stations

Valeriy Osypov¹,

PhD (Geography), Senior Researcher of the Hydrochemistry Department,

¹Ukrainian Hydrometeorological Institute, 37 Nauki Pr., Kyiv, 03028, Ukraine;

Andrii Bonchkovskyi¹,

Junior Researcher of the Hydrochemistry Department;

Andrii Oreshchenko¹,

PhD (Geography), Senior Researcher of the Department of Applied Meteorology and Climatology;

Dmytro Oshurok¹,

PhD (Geography), Senior Researcher of the Atmospheric Physics Department;

Natalia Osadcha¹,

Doctor (Geography), Head of the Hydrochemistry Department

ABSTRACT

Literature overview. Precipitation measurements include random and systematic errors. Systematic errors increase in the following order: evaporation loss, wetting loss, and wind-induced undercatch (World Meteorological Organization, 2008). The last one occurs because of the aerodynamic blockage under the precipitation gauge collector (Baghapour et al. 2017; Sevruk & Nespor, 1994). Field experiments have shown that wind-induced undercatch reaches 14% for rain and 40% for snow for the Tretyakov wind-shielded gauge (Goodison et al., 1998).

In Ukraine, precipitation records omit wind-induced undercatch correction.

This study **aims** to calculate true precipitation values at Ukrainian weather stations, evaluate existing methodologies for precipitation measurements correction, and create the digital archive of corrected precipitation values based on sub-daily observations.

Material and methods. We used four methods to quantify wind-related errors for the Tretyakov gauge with wind shield proposed by Golubev (Kononov et al., 2000), Bryazgin (Aleksandrov et al., 2005), Norway meteorological institute (Forland et al., 1996), and Yang (Yang et al., 1995). Sub-daily records were requested from Central Geophysical Observatory named after Boris Sreznevsky covering 207 stations between 1976 and 2019; 187 stations had more than 20 years' period.

Results. For the Tretyakov gauge, annual wind-induced undercatch ranges from 5 to 9.5%, depending on correction methodology. The highest bias is observed for the solid precipitation – from 17.7 to 27.4%. The precipitation loss increases along with annual wind speed at the weather station (correlation coefficient $r = 0.89$).

Conclusions. We suggest that Golubev's and Yang's methodologies estimate precipitation wind-induced undercatch more accurately at stations where blizzards are often observed, we recommended using the Golubev's methodology because it takes into account "false" precipitations.

The precipitation loss equals 0.2–4% according to the Golubev's method at covered weather stations and reaches 13–19% at the bare mountain regions or seashore. Solid precipitation is more sensitive to the influence of wind – snow loss averages 17.3% according to the Golubev methodology or 21% according to the Yang methodology, while rain loss – 2.6% or 6.7%, respectively.

The obtained database with corrected precipitation comprises sub-daily and daily records from 207 Ukrainian stations between 1976 and 2019. It could be used for hydrological and climatological research.

Keywords: *wind-induced undercatch, precipitation measurements, Tretyakov gauge, wind speed, precipitation map.*

References

1. Bogdanova, E. G., Golubev, V. S., Il'in, B. M., & Dragomilova, I. V. (2002). *New model for correction of measured precipitation and its use in Russian polar regions. Meteorology and Hydrology, 10*, 68–94 [in Russian].
2. State hydrometeorological service. (2011). *Guidelines for hydrometeorological stations and posts. Issue 3. Part 1. Meteorological observations at stations. 280* [in Ukrainian].
3. Sevruk, Boris, & Nespor, V. (1994). *The Effect of Dimensions and Shape of Precipitation Gauges on the Wind-Induced Error. In Global Precipitations and Climate Change (pp. 231–246). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-79268-7_14*
4. Golubev, V. S. (1979). *Research of the double fence cover influence on precipitation measurement of Tretyakov gauge. Trudy GGI, 258*, 91–101 [in Russian].
5. Alekseev, G. A. (1975). *Methods for estimating random errors of hydrometeorological information. Leningrad: Hydrometeoizdat, 96* [in Russian].
6. World Meteorological Organization. (2008). *Guide to Hydrological Practices, Volume I: Hydrology – From Measurement to Hydrological Information. 296*.
7. Smirnova, N. S. (Ed.). (1990). *Scientific and applied reference book on the climate of the USSR. Series 3. Long-term data. Parts 1-6. Issue 10. Ukrainian SSR. Book 1. Leningrad: Hydrometeoizdat, 605* [in Russian].
8. Baghapour, B., Wei, C., & Sullivan, P. E. (2017). *Numerical simulation of wind-induced turbulence over precipitation gauges. Atmospheric Research, 189*, 82–98. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.01.016>
9. Goodison, B. E., Louie, P. Y. T., & Yang, D. (1998). *WMO Solid precipitation measurement intercomparison: Final report. 212*.
10. Bogdanova, E. G. (1968). *Accounting the wind error in measured precipitation when calculating their average long-term values (norms). Trudy GGO, 215*, 45–56 [in Russian].
11. Golubev, V. S. (1973). *Methodology for correcting sub-daily and monthly values of atmospheric precipitation and the results of its verification. Trudy GGI, 207*, 11–27 [in Russian].
12. Kononov, D., Golubev, V. S., Bogdanova, E. G., & Ylin, B. M. (2000). *A full model for correction of precipitation measurements data and a method and algorithm for estimation of systematic error components. In Papers presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2000). WMO/TD- No. 1028; IOM Report - No. 74 (pp. 136–139)* [in Russian].
13. Bogdanova, E. G., Il'in, B. M., & Dragomilova, I. V. (2003). *Experience in using an improved methodology for adjusting daily precipitation amounts in various climatic conditions. Trudy GGO, 551*, 23–50 [in Russian].
14. State hydrological institute. (1973). *Guide for water balance stations. Leningrad: Hydrometeoizdat, 306* [in Russian].
15. Sevruk, B., & Hamon, W. R. (1984). *International Comparison of National Precipitation Gauges with a Reference Pit Gauge (WMO/TD-No. 38). Geneva, 139*.
16. Forland, E. J., Allerup, P., Dahlstrom, B., Elomaa, E., Jonsson, T., Madsen, H., ... Vejen, F. (1996). *Manual for operational correction of Nordic precipitation data (Report NR. 24/96). Oslo, 66*.
17. Yang, D., Goodison, B. E., Metcalfe, J. R., Golubev, V. S., Elomaa, E., Gunther, T., ... Milkovic, J. (1995). *Accuracy of Tretyakov precipitation gauge: Result of WMO intercomparison. Hydrological Processes, 9(8)*, 877–895. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360090805>

18. Aleksandrov, Y. I., Bryazgin, N. N., Førland, E. J., Radionov, V. F., & Svyashchennikov, P. N. (2005). Seasonal, interannual and long-term variability of precipitation and snow depth in the region of the Barents and Kara seas. *Polar Research*, 24(1–2), 69–85. <https://doi.org/10.3402/polar.v24i1.6254>
19. Kosovets, O., & Shvets, N. (2011). *History and physical-geographical description of meteorological stations of Ukraine (climatological reference book)*. Kyiv, 462 [in Ukrainian].
20. Grebin', V. V. (2010). *Modern streamflow regime of rivers in Ukraine (landscape-hydrology analysis)* [in Ukrainian]. Kyiv: Nika-Centr, 316 [in Ukrainian].
21. Olenev, A. M. (1987). *Impact of macrorelief on climate and landscape complexes*. Sverdlovsk, 86 [in Russian].
22. Mkrchian, O., & Shuber, P. (2013). Interpolation of meteorological data on precipitation and other climatic variables by regression-kriging. *Visnyk Lviv Univ. Ser. Geogr.*, 42, 258–264 [in Ukrainian].
23. Mkrchian, O., & Shuber, P. (2011). A method for geospatial and mapping of climatic characteristics from meteorological observation data. *Visnyk Lviv Univ. Ser. Geogr.*, 39, 245–253 [in Ukrainian].
24. Barabash, M. B., Pahaluk, O. E., & Tatarchuk, O. G. (2007). *Precipitation. Year*. In *National atlas of Ukraine* (p. 435). Kyiv, 435 [in Ukrainian].
25. Lipinskiy, B. M., Dyachuk, V. A., & Babichenko, B. M. (Eds.). (2003). *Climate in Ukraine*. Kyiv: Vyd-vo Raevskogo, 343 [in Ukrainian].
26. Barabash, M. B., Korzh, T. V., & Tatarchuk, O. G. (2004). Investigation of changes and fluctuations in precipitation at the turn of the 20th and 21st centuries in the context of global warming. *Nauk. Pr. UkrNDGMI*, 253, 92–102 [in Ukrainian].
27. Yang, D., & Simonenko, A. (2014). Comparison of Winter Precipitation Measurements by Six Tretyakov Gauges at the Valdai Experimental Site. *Atmosphere-Ocean*, 52(1), 39–53. <https://doi.org/10.1080/07055900.2013.865156>
28. Karl, T. R., Quayle, R. G., & Groisman, P. Y. (1993). Detecting Climate Variations and Change: New Challenges for Observing and Data Management Systems. *Journal of Climate*, 6(8), 1481–1494. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<1481:DCVACN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<1481:DCVACN>2.0.CO;2)
29. Legates, D. R. (1995). Global and terrestrial precipitation: A comparative assessment of existing climatologies. *International Journal of Climatology*, 15(3), 237–258. <https://doi.org/10.1002/joc.3370150302>
30. World Meteorological Organization. (2018). *Guide to Instruments and Methods of Observation*. 1385.
31. World Meteorological Organization. (2018). *WMO Solid Precipitation Intercomparison Experiment (SPICE). Instruments and Observing Methods*. Report No. 131. 1445. Retrieved from https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=20742#.X5lgIlgzZhE

Authors Contribution: Osipov V. V. - conceptualization, preparation of input data, methodology, calculations, text writing; Bonchkovskiy A. S. - preparation of input data, calculations; Oreshchenko A. V. - methodology, construction of a map of precipitation, writing the text; Oshurok D. O. - preparation of input data, text writing; Osadcha N. M. - text writing

Received 2 March 2021

Accepted 20 July 2021